

汛末长江中下游主要营养盐输送特征 及支流水系贡献

俞洋^{1, 2, 3} 王丹阳^{1, 2} 汤显强^{1, 2} 黎睿^{1, 21}

(1. 长江科学院流域水环境研究所, 湖北 武汉 430010;

2. 长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北武汉 430010;

3. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038)

【摘要】: 为分析长江中下游氮、磷、硅等营养盐的输送特征及洞庭湖、汉江、鄱阳湖对干流营养盐输送的贡献, 于2020年9月自三峡坝前至河口及洞庭湖、汉江、鄱阳湖长江入汇口沿程采集水样, 测定氮、磷、硅等营养盐浓度并分析沿程变化趋势, 计算总氮、总磷和溶解硅通量及主要支流贡献。结果表明: 长江中下游总氮浓度沿程下降, 在1.23~2.32mg/L间波动, 溶解态占比超过95%; 总磷浓度沿程上升, 在0.01~0.08mg/L间波动, 以颗粒态为主; 溶解硅浓度在汉口断面突增, 三峡坝前-汉口江段均值为5.52mg/L, 汉口-河口江段均值升高为10.8mg/L。总氮、总磷、溶解硅通量均沿程明显上升。洞庭湖、汉江及鄱阳湖对干流营养盐输送贡献较大, 其中洞庭湖对总氮、总磷、溶解硅输送通量的贡献分别达到163.2%、67.9%、23.6%, 但其汇入后干流水质类别未发生明显变化。洞庭湖、汉江及鄱阳湖汇入后干流水体综合营养状态指数波动范围在-12.72%至7.85%。本研究有助于了解长江中下游营养状态及支流湖泊对干流的贡献, 为中下游水环境管理提供科学依据。

【关键词】: 长江中下游 营养盐 通量 洞庭湖 汉江 鄱阳湖

【中图分类号】: X55 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)05-1039-12

近40a来, 长江流域经济快速发展。截至2016年, 长江经济带区域耕地面积达到4493.36万 hm^2 , 占全国耕地总面积的33.3%, 人口总量占全国总人口的43.03%^[1]。随着经济的发展, 长江流域工农业废水排放量急剧增加, 2018年长江经济带废水排放量超过全国总量的40%^[2]。在气候变化及大规模开发建设的双重影响下, 营养盐输送发生剧烈变化^[3]。过量的营养盐诱发水体富营养化, 使藻类爆发式生长, 形成水华。水华的爆发会使水体透明度下降、溶解氧降低, 继而导致水生动植物死亡、水体腥臭, 严重影响周边居民的生活和流域经济发展^[4, 5]。随着国家对长江流域点源污染治理力度的提升, 面源污染成为长江营养盐的主要来源, 在汛期极易随着地表径流进入干流^[6, 7, 8]。同时, 由于颗粒态磷(Particulate Phosphorus, PP)是总磷(Total Phosphorus, TP)主要组成部分, 受含沙量影响较大^[3], 且2020年长江干流各水文控制站汛期输沙量均占全年输沙量80%以上^[9], 因此, 对汛期来水后长

作者简介: 俞洋(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源保护与污染控制. E-mail: 2893444854@qq.com; 汤显强 E-mail: ckyshj@126.com

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2021531/SH; CKSF2021444/SH); 国家高层次人才特殊支持计划项目(CKSD2019542/SH); 中国长江三峡集团有限公司项目(201903145)

江干支流营养盐的监测极为重要。

近年来对长江干、支流营养盐的研究发现,长江上游水质优于中下游,干流近 40a 来水质逐渐好转,并在近 10 年内保持稳定,支流水质总体也有所改善^[10,11]。彭福利等^[10]利用 2006~2015 年 82 个断面水质数据,分析了三峡库区长江干支流营养盐浓度的变化趋势,发现总氮(Total Nitrogen, TN)、TP 浓度时间上总体呈上升趋势;陈善荣等^[11]对近 40 年长江干流水质的变化展开了研究,发现高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)和 TP 浓度均逐年下降,但近年来长江干流断面中 TP 的污染程度高于 COD_{Mn} 和 NH₃-N。长江营养盐输送特征也是长江流域研究热点之一,沈志良对 1997 年枯水期及 1998 年丰水期氮^[12]、磷及硅^[13]的输送特征进行分析,发现枯水期支流及湖泊贡献了超过一半的营养盐通量,丰水期磷及硅通量大部分由干流贡献;娄保锋等^[14]研究了长江干流水质变化和 TP、NH₃-N 通量变化,发现 2013~2018 年间 NH₃-N 通量明显下降,2017~2018 年 TP 通量较 2001~2002 年降低;江涛等^[15]于 2006 年对长江攀枝花以下干流溶解态无机氮(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN)、磷(Dissolved Inorganic Phosphorus, DIP)研究发现,长江 DIN、DIP 通量变化主要受径流量控制。目前,对长江流域 Si 的研究较少,李茂田等^[16]研究 1958~1983 年长江大通站溶解硅(Dissolved Silicon, DSi)发现,DSi 通量在 50 年内呈下降趋势;冉祥斌等^[17]发现 2006 年长江干流 DSi 通量在三峡坝后沿程上升;王昊等^[18]研究发现,1958~2014 年 DSi 通量的变化主要是由 DSi 浓度引起的。

长江营养盐一部分来源于干流沿程的累积,另一部分则来源于支流及湖泊的汇入^[12]。尽管支流对干流营养盐及营养状态存在较大的影响,但大部分针对长江营养盐的研究在空间尺度上集中于某个河段,缺乏对中下游干流、主要湖泊及支流的整体分析。同时, N、P、Si 的浓度变化直接影响了硅藻等浮游生物的生长状态^[19,20],但现有研究大多集中于 N、P 对水质的影响,鲜有同时对 N、P、Si 进行分析的工作。

基于此,本研究于 2020 年 9 月在长江中下游干、支流和湖泊设置采样断面,测定沿程 TN、TP 及 DSi(以 SiO₂计)浓度,研究其沿程变化趋势,计算长江干流营养盐通量并分析其输送特征,探究支流对营养盐通量及水质的影响,并借助综合因子评价法和综合营养状态指数法分析了长江中下游水质状况,判断了水体主要污染因子及营养状态。

1 研究区概况

本次研究沿长江干流设置采样断面 22 个,并在主要支流洞庭湖、汉江、鄱阳湖的长江入汇口设置采样断面,断面分布如图 1 所示,采样时间为 2020 年 9 月。

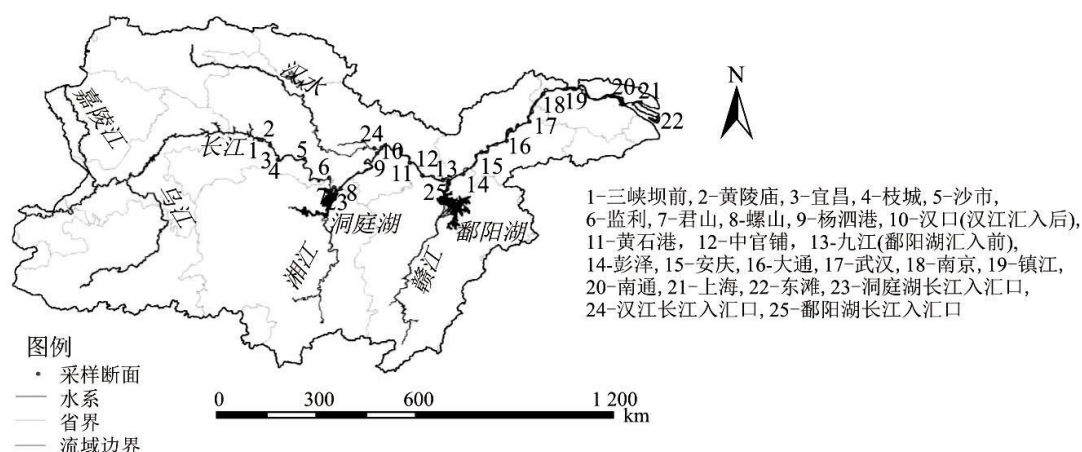


图 1 长江中下游采样断面分布

2 材料与方法

2.1 样品采集与指标测定

样品使用 5L 有机玻璃桶装采水器在水面 0.5m 以下采集, 现场使用多参数水质仪 (YSIEX02) 测定水温、pH、氧化还原电位、电导率、浊度及溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)浓度。样品保存于 1L 聚乙烯塑料瓶中, 并于装有冰袋的保温箱中保存及运输, 并在七日内送至实验室测定。

样品各项指标的测定均依照现行相关标准, TN、溶解态总氮(Total Dissolved Nitrogen, DTN)使用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定^[21], 硝态氮(NO₃-N)使用紫外分光光度法^[22], 亚硝态氮(NO₂-N)使用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法^[23], NH₃-N 使用纳氏试剂光度法测定^[24]。TP、溶解态总磷(Total Dissolved Phosphorus, DTP)使用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法^[25], DSi 使用钼蓝分光光度法^[26], 叶绿素 a(Chl-a)使用丙酮提取法测定^[27]。

2.2 数据分析与处理

2.2.1 统计分析

使用 SPSS25 检验营养盐浓度沿程变化趋势、各河段间浓度差异及各要素间相关性。趋势性分析中 Si. >0.05 时认定该营养盐沿程有增加或降低的趋势显著, Sig. <0.05 时则无显著趋势。差异性检验首先采用 K-S 检验方法检验数据正态性, 若数据呈正态分布则采用 t 检验, 非正态分布则采用 Mann-WhitneyU 检验方法, 多组独立样本则采用 Kruskal-Wallis 检验。Sig. <0.01 时存在极显著差异, Sig. <0.05 时存在显著差异, Sig. >0.05 则不存在显著差异。相关性分析同样需先检验数据正态性, 若服从正态分布则采用 Pearson 相关性检验, 若不服从则采用 Spearman 秩相关检验。Sig. <0.01 时相关性极显著, Sig. <0.05 时相关性显著, Sig. >0.05 时不显著相关。

2.2.2 营养盐通量计算

营养盐通量计算式为:

$$F = C \cdot Q / 1000 \quad (1)$$

式中: F 为营养盐通量, 单位为 kg/s; C 为采样断面营养盐实测浓度, 单位为 mg/L; Q 为各采样断面流量附近水文站当日流量, 单位为 m³/s。

2.2.3 综合水质标识指数

综合水质标识指数法以单因子水质标识指数法为基础, 判断各因子浓度对应的水质等级并计算得分, 利用整组水质因子得分计算综合水质得分, 分析主要污染因子, 评价水质等级, 并判断支流对干流水质的影响。该方法可对水质进行定性和定量的评价, 同时由于综合考虑各水质因子, 避免了因个别较差水质因子而否定综合水质, 能够科学判断河流水质情况^[28]。

本文中选用 DO、TN、TP、NH₃-N 四项指标作为水质因子进行计算, 计算公式详见参考文献[29, 30]。

2.2.4 综合营养状态指数

基于 Chl-a 的综合营养状态指数(The comprehensive trophic level index, TLI)在河流、湖泊的富营养化状态评价中运用

十分广泛，是衡量水体营养状态的重要指标，可用于评估干流营养状态及支流湖泊对干流营养状态的影响，计算公式见参考文献[31]。

取 Chl-a 及 TN、TP 为参数，对长江中下游干流及洞庭湖、汉江、鄱阳湖长江入汇口综合营养状态指数进行计算。对 Chl-a、TN、TP 进行相关性分析，得到干流各参数间相关系数，分别为 1、0.644、0.85。汉江、洞庭湖、鄱阳湖则采用前人研究中所得相关系数^[31]，分别为 1、0.82、0.84。

根据该指数可将水体分为不同营养状态^[31]，TLI≤30 时为贫营养状态，30~50 为中营养状态，50~60 为轻度富营养状态，60~70 为中度富营养状态，70~80 为重度富营养状态，>80 则为异常富营养状态。

3 结果

3.1 水体理化性质

各采样断面实测水温、pH、氧化还原电位、电导率、浊度及 DO 浓度如表 1 所示。长江中下游水温处于 22.74℃~25.4℃之间，水体呈弱碱性，氧化还原电位在 179~245.6mv 之间。电导率除在鄱阳湖口较低(28.71 μS/cm)外，其余断面较为稳定，均值为 300.92 μS/cm。上海断面浊度较高，达到 303.25NTU。DO 浓度均值为 7.42mg/L，达到 II 类水标准，接近 I 类水标准 7.5mg/L，含氧量较高。

3.2 营养盐浓度

长江中下游的 TN 浓度沿程显著下降，由坝前的 2.34mg/L 下降至东滩的 1.40mg/L，沿程趋势如图 2 所示。断面 TN 浓度在螺山和彭泽断面下降明显，分别由君山的 2.16mg/L 下降至螺山的 1.5mg/L、由九江的 1.67mg/L 下降至彭泽的 1.24mg/L。TN 浓度均值由坝前-君山的 2.03mg/L 下降为螺山-九江的 1.63mg/L，又继续下降为彭泽-东滩的 1.46mg/L。洞庭湖口、鄱阳湖口 TN 浓度分别为 1.31 和 0.58mg/L，分别为汇入前干流浓度的 62.4%和 34.7%。汉江 TN 浓度为 1.73mg/L。DTN 是长江中下游 TN 的主要组成部分，几乎在所有采样断面占比都达到 95%以上，而颗粒态氮(PN)含量大多不足 5%。DTN 和 PN 沿程波动趋势与 TN 类似，浓度明显下降。

各断面 TN 组分浓度如图 3 所示。NO₃-N 为长江中下游干流中 DTN 的主要组成部分，在全部采样断面浓度均占 DTN 一半以上，在沙市和监利断面超过 90%。NO₂-N 在水体中含量较低，超过一半断面浓度几乎接近于 0。NH₃-N 浓度在三峡大坝附近及武汉、上海处浓度较高。

表 1 各采样断面现场数据

采样断面	水温(℃)	pH	氧化还原电位(mv)	电导率(μS/cm)	浊度(NTU)	DO(mg/L)	流量(m ³ /s)
坝前	24.35	7.96	191.3	348.5	30.10	7.28	26500
黄陵庙	23.85	8.12	208.8	348.4	40.90	7.47	26800
宜昌	24.53	8.34	181.5	354.9	59.12	8.19	27800
枝城	23.90	8.02	220.1	350.9	51.00	8.04	28700
沙市	24.96	8.19	194.2	360.1	48.10	8.29	23800

监利	25.15	8.15	203.4	342.5	50.67	7.67	23200
君山	23.29	8.17	199.2	338.3	38.45	7.94	/
洞庭湖口	23.76	8.16	202.1	223.4	15.40	7.25	16100
螺山	23.80	7.95	210.5	240.9	27.54	7.28	40000
杨泗港	24.09	8.01	209.2	304.1	40.12	7.41	/
汉江	23.60	7.84	231.3	375.6	10.85	6.60	681.6
汉口	23.84	7.81	245.6	325.3	22.26	7.27	44300
黄石港	23.67	8.17	192.5	304.9	41.25	7.32	/
中官铺	22.74	7.95	209.7	272.4	33.45	7.14	/
九江	23.58	8.01	207.5	303.4	37.88	7.26	41600
鄱阳湖口	23.63	8.06	197.3	128.7	7.01	7.53	4690
彭泽	23.92	7.98	179.0	253.8	24.66	7.29	/
安庆	22.94	7.98	207.7	281.1	43.93	7.35	/
大通	23.60	7.81	233.8	271.2	25.61	6.86	50000
芜湖	24.01	8.20	195.5	285.7	33.27	7.38	/
南京	24.37	7.98	192.8	290.9	34.52	7.30	/
镇江	23.38	8.03	201.7	292.7	46.16	7.28	/
南通	24.25	8.15	208.6	291.9	30.30	7.64	/
上海	25.40	8.10	204.7	327.3	303.25	7.10	/
东滩	25.33	8.13	203.1	306.2	54.35	7.36	/

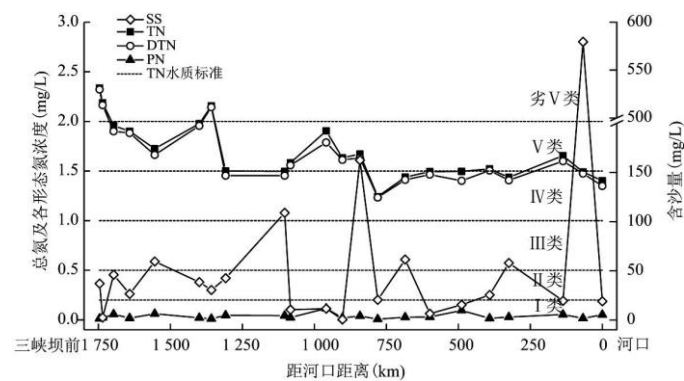


图 2 2020 年 9 月长江中下游干流水体悬沙、总氮及各形态氮浓度沿程分布

TP 浓度沿程波动上升,由坝前的 0.06mg/L 上升至东滩的 0.19mg/L,变化趋势如图 4 所示。沙市、九江、安庆、南京、镇江、上海断面 TP 浓度较高,上海断面浓度远超其他断面。颗粒态磷(PP)在 70%采样断面含量占 TP 浓度的一半以上,同样沿程波动上升,并在上海采样断面浓度最高。DTP 浓度在汉口-中官铺连续上升,并在镇江和上海两地突然上升,其余沿程变化趋势与 DTN 十分相似。

DSi 浓度在三峡坝前-杨泗港河段较为平稳,均值为 5.53mg/L,而汉口采样断面 DSi 浓度突增至 10.56mg/L,汉口-东滩河段 DSi 浓度均值为 10.71mg/L,汉口断面前后河段 DSi 浓度差异极显著,沿程趋势如图 5 所示。洞庭湖、汉江及鄱阳湖长江入汇口 DSi 浓度分别为 5.69、11.62 及 9.45mg/L。

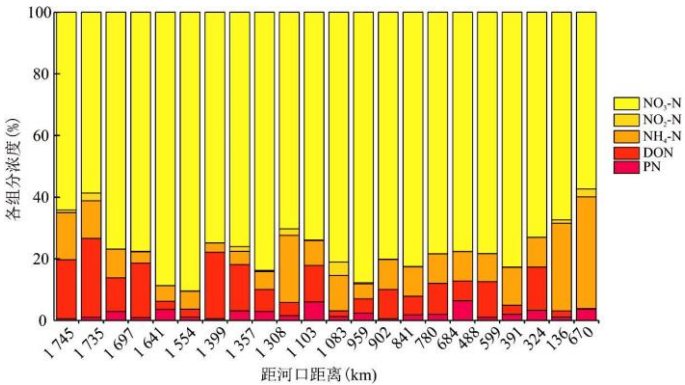


图 3 2020 年 9 月长江中下游干流水体总氮各组成成分

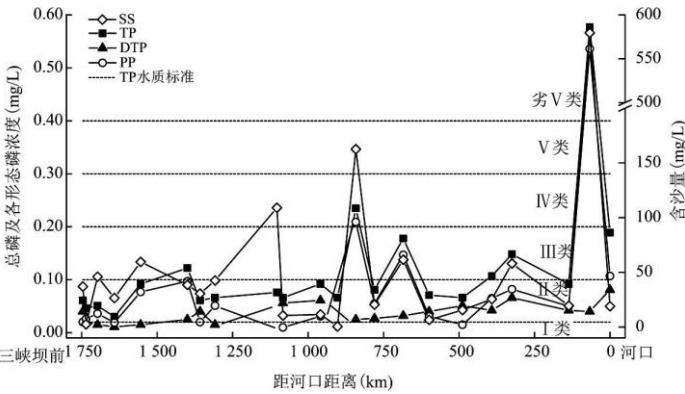


图 4 2020 年 9 月长江中下游干流水体悬沙、总磷及各形态磷浓度沿程分布

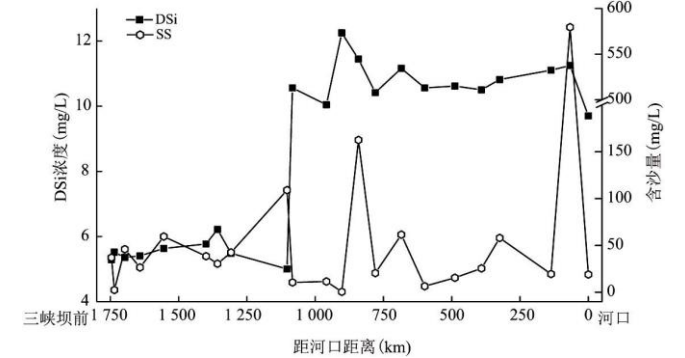


图 5 2020 年 9 月长江中下游干流水体悬沙及溶解硅浓度沿程分布

4 讨论

4.1 营养盐浓度变化

TN 浓度在螺山、彭泽两断面明显下降。坝前-君山、螺山-九江及彭泽-东滩 3 个河段 TN 浓度差异性极显著,螺山和彭泽断面 TN 浓度的下降是由于洞庭湖及鄱阳湖汇入的 TN 浓度均较汇入前干流更低,且两湖流量较大,9 月平均径流量分别占长江干流的 52.48%和 16.63%^[32],大量低营养盐浓度水的输入直接稀释了长江干流中 TN 的浓度。TN 浓度变化与含沙量(SS)无显著相关性($p=-0.107$, $\text{Sig.}=0.636$)。

$\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度较低是由于还原性较强,在富氧水体中极易被氧化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。除去东滩采样断面,其余断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度与 SS 显著正相关($p=0.463$, $\text{Sig.}=0.034$),这可能是泥沙吸附 $\text{NH}_3\text{-N}$ 后的释放行为导致的^[33]。同时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 主要来源于工业污水及生活污水,其中生活氨氮排放量占比达 70%^[34]。武汉及上海 2019 年末户籍人口分别达到 884 和 1462 万人,地区生产总值(Gross Regional Product, GRP)也高于长江中下游其他城市^[35]。两地经济的快速发展及较高的人口数量可能是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较高的主要原因。监测到 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量均相对较高,这可能是由于氨氮在 $20^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ 碱性富氧水中易发生硝化反应,生成中间产物 $\text{NO}_2\text{-N}$ ^[36]。

1998 年长江干流宜昌段 TN 各组分中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 占比 53%, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 各占比 0.06%、4.17%,溶解态有机氮(Dissolved Organic Nitrogen, DON)占比 26.78%, PN 占比 15.99%^[12]。与本次研究对比发现,宜昌段 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量明显上升,已达到 TN 总量的 76.8%; $\text{NH}_3\text{-N}$ 略有上升,现占比 9.31%;DON、PN 含量下降,目前各占比 10.89%、9.31%; $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量基本没有改变。分析其比例变化的原因,一是由于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 主要来源于农业和生活污水,而湖北省化肥施用量由 1998 年的 262.2 万 t 上升至 2017 年的 317.9 万 t^[37],同时,人口的增长也导致了生活污水排放量的上升,从而导致 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量升高;二是 DON 主要来源于工业废水,而近年来工业废水管控愈加严格,排放量降低,可能导致其含量下降;同时,三峡建成蓄水后,拦截了大量泥沙,部分颗粒态营养盐随之滞留^[38],PN 含量下降,各形态氮比例也随之发生变化。

PP、TP 浓度均与 SS 显著正相关($p_1=0.658$, $\text{Sig.}_1=0.002$; $p_2=0.434$, $\text{Sig.}_2=0.043$),这是由于 PP 易被悬浮泥沙吸附^[3],且 PP 是 TP 的主要组成部分,对 TP 沿程变化影响明显。上海经济发展较沿线其他城市更为迅速,大量城镇污水及工业污水的排放可能导致其采样断面 TP 浓度较其他断面更高^[39]。汉口处 DTP 浓度的升高一定程度上受到支流汇入的影响,汉江浓度为 0.04mg/L 的 DTP 汇入干流后,干流 DTP 浓度由螺山的 0.02mg/L 上升至汉口的 0.06mg/L。

汉江长江入汇口 DSi 浓度约为汇入前干流浓度的 2 倍,其汇入可能是干流汉口断面 DSi 浓度上升的原因之一。同时,长江流域硫酸岩自上游至下游风化程度增加^[40],也可能导致 DSi 浓度的变化^[41]。DSi 浓度变化与 SS 无显著相关性($p=-0.091$, $\text{Sig.}=0.685$)。

DSi 浓度沿程变化趋势与 DTN、DTP 存在明显差异,这可能是由于氮磷的主要来源为农业养殖、化肥施用、工业排放及城镇生活排放^[1, 42],受人类生产生活影响较大,而硅肥施用及硅产业发展目前对河流中 DSi 浓度影响有限,故 DSi 浓度波动较小,受自然条件影响也更为明显。

4.2 营养盐通量变化

TN 通量由坝前的 61.9kg/s 上升至大通的 74.9kg/s,洞庭湖、汉江、鄱阳湖分别贡献了 163.2%、9.1%和 20.8%。洞庭湖的贡献超过 100%是由于监利-螺山段干流 TN 通量受浓度下降影响明显,尽管支流大量汇入且河段流量明显上升,通量增加较小。基于同样的原因,洞庭湖向干流输送了 21.1kg/s 的 TN 通量后,干流 TN 通量仅上升了 14.2kg/s。鄱阳湖向干流汇入了 2.7kg/s 的

TN, 对九江-大通段区间贡献率达到 50.9%。汉江 TN 通量为 1.2kg/s, 汇入干流后干流通量却增加了 12.9kg/s, 该段通量上升主要是由于干流流量和 TN 浓度的增加。

对氮通量的研究显示, 长江干流 1998 年丰水期宜昌断面 TN 通量为 92.8kg/s^[12], 8 月大通断面 TN 通量为 108.1kg/s^[43], 本次研究中则分别仅为 54.4 和 74.9kg/s。可以发现长江 2020 年 N 通量较 1998 年下降明显, 这可能是由于 1998 年长江特大洪水, 流量较大, 输送的营养盐更多。

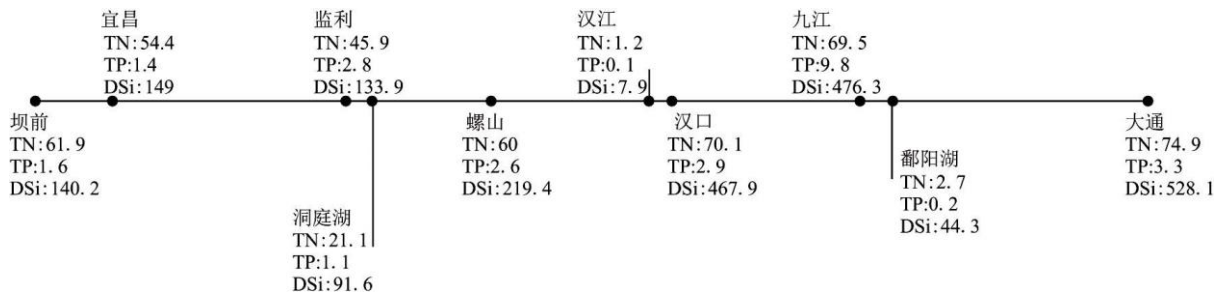


图 6 2020 年 9 月长江中下游 TN、TP 及 DSi 通量沿程变化

TP 通量沿程明显上升, 由坝前的 1.6kg/s 上升至大通的 3.3kg/s, 其中洞庭湖、汉江、鄱阳湖分别贡献了 67.9%、3.5%和 9.8%。长江干流在洞庭湖汇入后 TP 通量减少了 0.2kg/s, 鄱阳湖汇入后则减少了 6.5kg/s。这是由于螺山断面的 TP 浓度较监利下降了 45.9%, 大通断面更是较九江减少了 71.9%, TP 浓度的大幅降低对干流的影响超过了流量的增大和支流的汇入。汉江汇入后长江干流 TP 通量增加了 0.3kg/s, 汉江贡献为 20.8%。螺山-汉口段水体中 TP 浓度变化不大, 通量的上升主要原因为支流汇入和干流流量的增加。

本次宜昌、汉口、大通断面 TP 通量处于以往研究所得通量波动范围内, 多年间基本保持稳定。宜昌断面 TP 通量在本研究中为 1.4kg/s, 在 1961~1990 年间约为 6.3kg/s, 1991~2002 年间为 4.9kg/s, 2001~2012 年间则下降至 0.9kg/s^[44], 但在随后几年内又逐渐上升至 2018 年的 1.7kg/s^[14]。汉口处 TP 通量则由 2001 年的 1.7kg/s 上升至 2016 年的 3.5kg/s, 又在 2018 年降为 2.4kg/s^[14], 本次采样数据中汉口断面 TP 通量为 2.9kg/s。大通断面 TP 通量在本次研究中为 3.3kg/s, 2004 年为 2.9kg/s, 2010 和 2016 年高达 4.4kg/s, 后又下降至 2018 年的 2.5kg/s^[14]。

DSi 通量由 140.2kg/s 上升至 528.1kg/s, 增幅达到 276.7%, 洞庭湖、汉江、鄱阳湖分别贡献了 23.6%、2%、11.4%。洞庭湖 DSi 通量为 91.6kg/s, 洞庭湖汇入后干流 DSi 通量却只增加了 85.5kg/s, 这是干流监利-君山段 DSi 浓度下降导致的。汉江对干流 DSi 通量贡献仅有 3.2%, 但其汇入后干流 DSi 浓度升高了 92.6%, 是干流通量的增加主要原因。鄱阳湖对干流通量的贡献达到 85.6%。1998 年干流宜昌段 DSi 通量为 205.8kg/s^[13], 而本次研究则仅为 148.9kg/s, 较 1998 年下降了 27.6%。

可以发现, 洞庭湖对总氮、总磷及溶解硅的通量贡献都远大于汉江及鄱阳湖。这是由于各支流流量差异较大, 洞庭湖流量明显大于其他支流湖泊。采样期间洞庭湖流量达 16100m³/s, 低于坝前-洞庭湖河段 38%, 而鄱阳湖流量为 4690m³/s, 较干流流量低 89%, 汉江更是仅有 681.6m³/s, 与干流差距达到 98%。

4.3 支流汇入对干流营养水平的影响

水质级别结果如表 2 所示, 其中 P 为各指标单因子水质标识指数, X_1 、 X_2 为综合水质得分。经计算, 长江中下游干流有 63.6% 的采样断面达到 II 类水标准, 31.8% 的断面达到 III 类水标准, 其中绝大多数在中游河段。下游水质明显优于中游, 但上海段为 IV 类水体, 东滩为 III 类。2019 年上海市 GRP 达到 3.27×10^8 万元, 远超过长江中下游其他城市^[35], 排放入河的生产生活废水增加可

能对水质产生了影响。陈善荣等于 2019 年对长江干流 59 个国控断面监测显示^[11], 2019 年长江干流 59 个断面中 6.8%为 I 类水, 89.8%为 II 类, 3.4%为 III 类, 对比发现长江中下游干流水质较 2019 年略差。这与其他文献得出的结论产生了差异, 究其原因, 一是由于本次采样并未采集上游河段数据, 上游部分城市较下游发展缓慢, 废水排放量更小, 水质可能更好; 二是由于仅分析了汛末数据, 长江主要受面源污染影响^[6,7,8], 枯水期部分指标浓度会优于丰水期, 如 DIN 通常在 5~8 月出现浓度偏高的情况^[15]。

比较各项指标的单因子水质标识指数, 发现 P_{DO} 在 0.9~2.4 间波动, 各断面 DO 含量均达到 II 类水标准, 并在宜昌-君山江段及九江、南通断面达到 I 类水标准; 12 个采样断面 NH_3-N 达到 I 类水标准, 芜湖、大通断面指数最低, 为 1.0, 9 个断面达到 II 类, 东滩处 NH_3-N 略高, 指数为 3.0, 达到 III 类水标准; TP 指数在九江断面为 4.3, 达到 IV 类标准, 上海处为 6.4, 处于劣 V 类, 其余各断面均在 2.1~3.9 间波动, 处于 II 类、III 类水级别; TN 在所有断面都超过 IV 类水标准, 最低指数为 4.5, 13 个断面 TN 浓度处于 V 类, 坝前、黄陵庙、监利、君山四个断面更是达到劣 V 类标准, 是长江中下游丰水期水质的最主要污染因子。

表 2 各采样断面水质级别

采样断面	P_{DO}	P_{TN}	P_{TP}	P_{NH_3-N}	X_1, X_2	水质级别	TLI 指数
坝前	2.1	6.2	2.5	2.6	3.4	III	/
黄陵庙	2.0	6.1	2.3	2.3	3.2	III	37.86
宜昌	0.9	5.9	2.4	2.1	2.8	II	/
枝城	0.9	5.8	2.1	1.5	2.6	II	/
沙市	0.9	5.5	2.9	1.4	2.7	II	/
监利	1.0	6.0	3.2	1.2	2.8	II	/
君山	0.9	6.1	2.5	1.6	2.8	II	41.78
螺山	2.1	5.0	2.6	1.6	2.8	II	46.56
杨泗港	2.1	5.0	2.7	1.4	2.8	II	43.32
汉口	2.1	5.2	2.6	2.6	3.1	III	46.66
黄石港	2.2	5.8	2.9	2.0	3.2	III	/
中官铺	2.2	5.3	2.6	2.1	3.0	III	/
九江	1.0	5.3	4.3	1.5	3.0	III	56.57
彭泽	2.1	4.5	2.8	1.2	2.6	II	49.41
安庆	2.1	4.9	2.8	1.1	2.7	II	53.86
芜湖	2.4	5.0	2.6	1.0	2.8	II	46.41
大通	2.1	5.0	2.6	1.0	2.7	II	/
南京	2.1	5.0	3.1	1.1	2.8	II	50.46
镇江	2.1	4.9	2.5	2.1	2.9	II	51.4

南通	1.0	5.3	2.9	2.0	2.8	II	47.42
上海	2.3	5.0	6.4	2.8	4.1	IV	69.62
东滩	2.1	4.8	3.9	3.0	3.5	III	/

尽管洞庭湖、汉江、鄱阳湖对干流输送营养盐通量有相当大的贡献,但在洞庭湖、鄱阳湖汇入后,干流水质类别并未下降,甚至在鄱阳湖汇入后水质类别上升,综合水质标识指数由 3.0 下降至 2.6。这是由于两湖对干流通量的贡献以流量为主,营养盐浓度较低。洞庭湖口综合水质评价指数为 2.6,与君山、螺山的 2.8 基本持平,鄱阳湖口水质指数仅为 1.9,水质优于干流。汉江综合水质评价指数为 3.5,汇入后干流水质由 II 类下降至 III 类,指数由 2.8 上升至 3.1。

计算中下游干流各采样断面 TLI 指数发现,九江、安庆、南京、镇江处于轻度富营养化状态,上海处于中度富营养化状态,其余断面均处于中营养状态。长江下游水质类别优于中游,但 TLI 却更高,说明下游藻类生长较中游更旺盛。

洞庭湖及鄱阳湖长江入汇口 TLI 分别为 48.65 及 47.32,即长江中下游两个重要湖泊均呈现中营养状态。汉江长江入汇口 TLI 为 46.05,同样处于中营养状态。有研究显示,1991、1992 年洞庭湖 TLI 分别为 29.02、29.88,处于轻营养水平。1993~2018 年则进入中营养化水平,2003 年后 TLI 开始超过 40,2015~2018 年洞庭湖 TLI 指数为 47.93^[48],与本次研究成果基本相符。鄱阳湖 2009~2016 年 TLI 指数上下波动但差异不大,均值为 47.79。2011、2012 年均超过 50,达到富营养水平,其余年份均为中营养水平,2016 年 TLI 指数最低,为 43.6^[46]。结合本次研究数据来看,鄱阳湖营养状态多年间基本稳定,近年来有小幅恶化趋势。

可以发现,长江中下游干流 TLI 的变化受两湖一江的影响较为明显。洞庭湖及汉江 TLI 较入汇口前干流更高,汇入后干流 TLI 均明显升高。洞庭湖汇入后干流 TLI 由 41.8 上升至 46.6,上升了 11.48%。汉江汇入后 TLI 由 43.3 上升至 46.7,上升了 7.85%。鄱阳湖 TLI 低于入汇口前干流,汇入后干流 TLI 由 56.6 下降至 49.4,下降了 12.72%。

5 结论

长江中下游 TN 浓度沿程下降,以溶解态为主,主要成分为 NO₃-N。TP 浓度沿程波动上升,颗粒态为主要形态。DSi 浓度在汉江汇入后明显升高,后又保持稳定。TN、DSi 浓度变化与 SS 浓度无显著相关性,TP 浓度则与 SS 浓度显著正相关。TN、TP、DSi 通量均沿程上升。TN 通量上升主要是受到流量增大的影响,TP 和 DSi 则同时受到流量增大和营养盐浓度升高的影响。

长江中下游水质主要影响因子为 TN,干流水质以 II 类水为主。九江、安庆、南京、镇江共 4 个断面为轻度富营养化状态,上海为中度富营养化状态,其余采样断面均呈现中营养状态,下游综合营养状态指数整体高于中游。洞庭湖、汉江、鄱阳湖长江入汇口均呈现中营养状态。

支流汇入对营养盐通量和干流水质均造成了一定影响。由于洞庭湖流量较大,其汇入对干流通量贡献较高,对 TN、TP、DSi 通量贡献分别为 163.2%、67.9%和 23.6%。鄱阳湖对 TN、TP、DSi 通量贡献分别为 20.8%、9.8%和 11.4%。汉江贡献相对较小,对三类营养盐通量的贡献分别为 9.1%、3.5%和 2%。洞庭湖的汇入未对干流水质等级产生明显影响,汉江汇入后干流水质由 II 类下降为 III 类,鄱阳湖汇入后干流水质由 III 类上升为 II 类。干流营养状态指数受支流及湖泊影响较为明显,洞庭湖汇入后指数上升了 11.48%,汉江汇入后指数上升了 7.85%,鄱阳湖汇入后指数下降了 12.72%。

参考文献:

[1]阮熹晟,李坦,张藕香,等.基于生态服务价值的长江经济带耕地生态补偿量化研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):

- [2]李芸邑,刘利萍,刘元元.长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素[J].环境科学,2021,42(8):3820-3828.
- [3]TANG X Q,WU M,LI R.Distribution, sedimentation, and bioavailability of particular phosphorus in the mainstream of the Three Gorges Reservoirs[J].Water Research,2018(140):67-71.
- [4]汤显强.长江流域水体富营养化演化驱动机制及防控对策[J].人民长江,2020,51(1):80-87.
- [5]TANG X Q,LI R,HAN D,et al.Response of eutrophication development to variations in nutrients and hydrological regime:A case study in the Changjiang River(Yangtze) basin[J].Water,2020,12(6):1634-1653.
- [6]WANG X,HAO F H,CHENG H G,et al.Estimating non-point source pollutant loads for the large-scale basin of the Yangtze River in China[J].Environment Earth Sciences,2011,63(5):1079-1092.
- [7]赖敏,王伟力,郭灵辉.长江中下游城市群农业面源污染氮排放评价及调控[J].中国农业资源与区划,2016,37(8):1-11.
- [8]肖书兴,白福臣.长江中下游粮食主产区农业面源污染对粮食经济的生态压力研究[J].生态经济,2019,35(7):155-160.
- [9]水利部长江水利委员会.2020年长江泥沙公报[R].湖北:长江出版社.2020.
- [10]彭福利,何立环,于洋,等.三峡库区长江干流及主要支流氮磷叶绿素变化趋势研究[J].中国科学:技术科学,2017,47(8):845-855.
- [11]陈善荣,何立环,林兰钰,等.近40年来长江干流水质变化研究[J].环境科学研究,2020,33(5):1119-1128.
- [12]沈志良.长江氮的输送通量[J].水科学进展,2004(6):752-759.
- [13]沈志良.长江磷和硅的输送通量[J].地理学报,2006,61(7):741-751.
- [14]娄保锋,卓海华,周正,等.近18年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析[J].环境科学研究,2020,33(5):1150-1162.
- [15]江涛,俞志明,宋秀贤,等.长江水体溶解态无机氮和磷现状及长期变化特点[J].海洋与湖沼,2012,43(6):1067-1075.
- [16]李茂田,程和琴.近50年来长江入海溶解硅通量变化及其影响[J].中国环境科学,2001,21(3):193-197.
- [17]冉祥斌,刘军,于志刚,等.典型枯水年长江干流硅的分布、输送与滞留[J].湖泊科学,2017,29(3):740-752.
- [18]王昊,冉祥斌,臧家业,等.长江与黄河入海活性硅输送规律及变化趋势[J].湖泊科学,2018,30(5):1246-1259.
- [19]LI M T,XU K Q,MASATAKA W,et al.Long-term variations in dissolved silicate,nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J].Estuarine,Coastal and Shelf

Science, 2007, 71:3-12.

[20]王江涛,曹婧.长江口海域近50年来营养盐的变化及其对浮游植物群落演替的影响[J].海洋环境科学,2012,31(3):310-315.

[21]中华人民共和国环境保护部.水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法:HJ 636-2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.

[22]国家环境保护总局.水质硝酸盐氮的测定紫外分光光度法:HJ/T 346-2007[S].北京:中国环境科学出版社,2007.

[23]国家环境保护总局.水质亚硝酸盐氮的测定分光光度法:GB/T 7493-1987[S].北京:中国环境科学出版社,1987.

[24]中华人民共和国环境保护部.水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法:HJ 535-2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009.

[25]国家环境保护总局.水质总磷的测定钼酸铵分光光度法:GB/T 11893-1989[S].北京:中国环境科学出版社,1989.

[26]中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.工业循环冷却水和锅炉用水中硅的测定:GB/T 12149-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[27]中华人民共和国环境保护部.水质叶绿素a的测定分光光度法:HJ 897-2017[S].北京:中国环境科学出版社,2017.

[28]宁阳明,尹发能,李香波.几种水质评价方法在长江干流中的应用[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(12):126-133.

[29]徐祖信.我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005(4):482-488.

[30]徐祖信.我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005(3):321-325.

[31]许秋瑾,郑丙辉,朱延忠,等.三峡水库支流营养状态评价方法[J].中国环境科学,2010,30(4):453-457.

[32]长江水利委员会水文局.长江流域重要控制断面水资源监测通报[R].湖北:水利部长江水利委员会,2020(9):2.

[33]苏青青,宋林旭,刘德富,等.三峡水库香溪河沉积物氮含量和氨氮释放特征[J].水生态学杂志,2018,40(3):1-7.

[34]张占平.水体中氨氮污染来源及其控制——富营养化的思考[J].内蒙古环境科学,2008,20(5):71-72.

[35]国家统计局.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019.

[36]徐开钦,林诚二,牧秀明,等.长江干流主要营养盐含量的变化特征——1998~1999年日中合作调查结果分析[J].地理学报,2004(1):118-124.

[37]国家统计局,环境保护部.中国环境统计年鉴2017[M].北京:中国统计出版社.

-
- [38]冉祥滨,姚庆祯,巩瑶,等.蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J].水生态学杂志,2009,30(2):1-8.
- [39]TONG Y D,BU X G,CHEN J Y,et al.Estimation of nutrient discharge from the Yangtze River to the East China Sea and the identification of nutrient sources[J].Journal of Hazardous Materials,2017(321):728-736.
- [40]罗超.长江河水与悬浮物地球化学研究:风化与源汇过程[D].南京大学,2015.
- [41]PAUL T,DAVID M N,ALEIDO J,VAN BENNEKOM,et al.The Silica Balance in the World Ocean:A Reestimate[J].Science,2012,268:375-379.
- [42]王岩,姜霞,李永峰,等.洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J].环境科学研究,2014,27(5):484-491.
- [43]段水旺,章申,陈喜保,等.长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计[J].环境科学,2000(1):53-56.
- [44]周建军,张曼,李哲.长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J].湖泊科学,2018,30(4):865-880.
- [45]王丽婧,田泽斌,李莹杰,等.洞庭湖近 30 年水环境演变态势及影响因素研究[J].环境科学研究,2020,33(5):1140-1149.
- [46]杜冰雪,徐力刚,张杰,等.鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系[J].环境科学研究,2019,32(5):795-801.